一种基于 LoRaWAN 的自适应多帧高效传输方法 *

任 智，秦 军†，姜 楠，王坤龙

(重庆邮电大学通信与信息工程学院，重庆 400065)

摘 要：针对 LoRaWAN(long range wide area network)协议中 LoRa 网关与 LoRa 终端间数据多帧传输方式存在控制开销和传输时延较大的问题，提出一种基于 LoRaWAN 的自适应多帧高效传输方法(adaptive multi-frame efficient transmission，AMFET)，包含自适应多帧发送机制、自适应多帧接收确认机制和丢帧识别机制。自适应多帧发送机制对需确认数据消息设置优先等级，对高级需确认数据消息进行立即确认，对低级需确认数据消息在自适应发送模式结束后统一进行确认，同时将 Fpending 机制引入 LoRaWAN 上行多帧传输；自适应多帧接收确认机制通过位向量压缩技术记录已接收数据帧信息，从而单次对多个需确认数据消息进行合并确认；丢帧识别机制利用需确认帧编号(confirmed data identity，CDID)识别低级需确认消息是否丢失，避免终端异常进入休眠模式。通过数学分析和实验测试，分别对 AMFET 方法的性能进行了理论验证和实验验证，验证结果表明，相对于原 LoRaWAN 多帧传输方式，AMFET 方法在保证数据传输可靠性的前提下，有效降低了数据传输时延和数据传输能耗。

关键词：LoRaWAN 协议；Fpending 机制；位向量压缩；自适应多帧传输；合并确认

中图分类号：TN915.06 doi: 10.19734/j.issn.1001-3695.2018.11.0840

Method of adaptive multi-frame efficient transmission based on LoRaWAN

Ren Zhi, Qin Jun†, Jiang Nan, Wang Kunlong

(*School of Communication & Information Engineering*, *Chongqing University of Posts & Telecommunications*, *Chongqing* 400065, *China*)

Abstract: As for the problem that the control overhead and transmission delay are large in multi-frame transmission mode between LoRa gateway and LoRa terminal in LoRaWAN protocol, this paper proposed an adaptive multi-frame transmission method, which includes adaptive multi-frame sending mechanism, adaptive multi-frame receiving confirmation mechanism and frame loss recognition mechanism. The first mechanism sets priority level of the confirmed messages, it make confirm immediately for high-level confirmed messages, and confirms for low-level confirmed messages uniformly after the end of adaptive sending mode. At the same time, the Fpending mechanism is introduced into LoRaWAN uplink multi-frame transmission. The second mechanism records the received message frame information by bit vector compression technology, so as to merge confirm for multiple confirmed messages once. The third mechanism uses the CDID value to identify whether the low-level acknowledgment message is lost, and prevents the terminal from entering the sleep mode abnormally. The mathematical analysis and experimental test results show that the AMFET mechanism can effectively reduce data transmission delay and data transmission energy consumption on the premise of guaranteeing the reliability of data transmission compared to the original mechanism.

Key words: lorawan protocol; fpending mechanism; bit vector compression; adaptive multi-frame transmission; merged confirm

0 引言

低功耗广域网[1](low power wide area network，LPWAN)是一种解决物联网远距离、低功耗通信需求的物联网技术，它的出现弥补了传统 M2M 技术[2] 和无线传感网络技术[3]的不足，实现了广泛的物联网应用及物联网设备间的互连通信。LoRa 技术[4~6] 作为一种新型的 LPWAN 无线通信技术，它采用线性扩频调制技术，通过改变正交扩频因子可实现变数据速率传输，具有远距离、低功耗、抗干扰的通信能力。LoRaWAN 协议[7,8] 是 LoRa 联盟推出的一项基于开源的 MAC 层协议的低功耗广域网标准，它规定了 LoRa 网络的拓扑架构、设备角色、传输方案，是目前相对比较完整和可靠的一种 LoRa 网络 MAC 层解决方案。

根据不同的应用需求，LoRaWAN 将终端设备划分为 A、B、C 三种等级模式[9,10]，其中 A 级模式为 LoRa 终端默认支持的模式，终端为通信发起方，采用 ALOHA 方式[11]传输消息，消息发送完毕立即进入休眠模式，功耗最低；B 级模式通过信标使网关与终端同步，终端在调度时间内打开额外接收窗口，提高下行链路传输效率；C 级模式原理相对简单，终端连续打开接收窗口，降低下行传输时延。A 级模式的终端可根据实际需求切换到 B 级模式或 C 级模式[12]，本文主要研究 LoRaWAN 的 A 级传输模式。

收稿日期：2018-11-18；**修回日期：**2019-01-11 **基金项目：**国家自然科学基金资助项目（61379159）；长江学者和创新团队发展计划基金资助项目（IRT1299）

作者简介：任智（1971-），男，教授，博导，博士，主要研究方向为宽带自组网与无线通信；秦军（1993-），男（通信作者），硕士研究生，主要研究方向为 LoRa 物联网理论与技术（qinjun1027@163.com）；姜楠（1992-），男，硕士研究生，主要研究方向为自组织网络协议；王坤龙（1993-），男，硕士研究生，主要研究方向为物联网理论技术与 MAC 协议.

在 A 级模式中，LoRaWAN 协议针对 LoRa 网关与 LoRa 终端间的多帧传输提出一种 Fpending 机制，该机制通过将消息中的 Fpending 控制位标记为 1(默认为 0)，用于指示终端设备额外打开接收窗口，接收网关待发送的数据消息。这种机制虽然对多帧传输进行了相关的优化，但其控制开销和时延较大，传输效率相对较低。

1 LoRaWAN 多帧传输及问题描述

1.1 LoRaWAN 多帧传输原理

在 LoRaWAN 多帧传输中，如图 1 所示，下行链路采用 Fpending 机制，通过 Fpending 控制位触发终端打开额外接收窗口；在上行链路中，发送一个消息后，等待两个接收窗口后立即进行下一消息的传输，或者当接收到一个下行消息后立即发送下一消息。多消息传输机制可分为需确认多消息传输和无须确认多消息传输[13]，从链路角度来看可分为上行多消息传输和下行多消息传输。

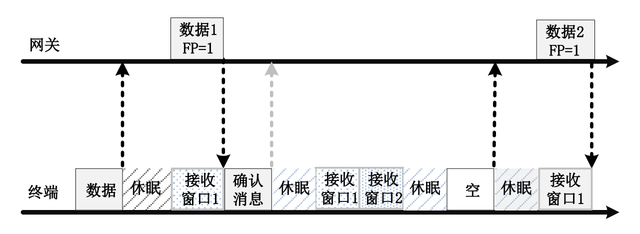


图 1 LoRaWAN 多帧传输模型

Fig. 1 Lorawan multiframe transmission model

网关进行下行消息传输时，网关若有连续数据传输，则将 Fpending 位置为 1，发送该消息后等待终端的响应消息。终端检测前导码，进行下行消息的接收，如果为需确认数据消息类型，则终端立即发送一个确认消息，休眠后打开两个接收窗口；如果消息为无须确认数据消息类型，则终端立即发送一个空消息，进入休眠模式，随后打开接收窗口。网关接收到终端的响应消息(确认消息/空消息)后，可以选择在两个接收窗口的任一窗口进行下一消息的传输。

终端进行上行消息传输时，消息类型仍然分为需确认数据消息和无须确认数据消息两种类型。对于需确认数据消息类型，终端发送数据后进入休眠模式，随后打开两个接收窗口，等待接收确认消息。如果终端接收的消息为确认消息，则终端立即传输下一消息；如果终端在接收窗口 1 和接收窗口 2 两个窗口中均未接收到网关的确认消息，则终端在等待超时后对本条消息进行重传。对于无须确认数据消息类型，终端发送数据后打开两个接收窗口，只要其中一个接收窗口收到网关的消息，终端立即切换至发送模式，传输下一消息；否则，终端只有在接收窗口 2 结束后，才能传输下一消息。

1.2 问题描述

在研究中发现 LoRaWAN 协议的多帧传输方式存在以下问题：

a)在上行传输方案中，由于终端每次发送一个上行消息后都会打开两个接收窗口，用于接收网关发送的下行消息。若网关没有下行数据传输到终端，则终端将白白等待两个接收窗口的时间，影响终端数据的传输效率，增加传输时延和能耗。

b)在下行传输方案中，当终端接收到 Fpending 位为 1 的消息时，为了继续接收网关下发的数据消息，终端需要发送一个空消息来触发其接收窗口的打开，这种传输方式不仅会造成控制开销的增加，也会影响下行数据消息的传输时延。

c)在 LoRaWAN 传输方案中，对于多个需要确认的数据消息，网关/终端只有在收到当前数据消息的确认帧后才会继续发送下一个数据消息，但在有些应用场景下，应用数据对于时序要求并不严格，这些数据消息并不需要立即进行确认回复，因此，这种发前等待的确认机制会增加数据消息的整体传输时延。

2 自适应多帧高效传输方法

为了解决上述问题，本文提出一种基于 LoRaWAN 的自适应多帧高效传输方法 AMFET，该方法包含自适应多帧发送机制、自适应多帧接收确认机制和丢帧识别机制。

2.1 自适应多帧发送机制

自适应多帧发送机制的目标是为了提高发送端的数据消息传输效率，降低传输时延。其主要思路是将发送端数据消息分为高级需确认消息、低级需确认消息和无须确认消息，从而降低高级需确认消息的响应时延；通过 Fpending 机制提高下行多帧数据消息的传输效率，避免“空消息”触发机制带来的控制开销。

自适应多帧发送机制具体内容如下：

a)根据接收端对消息的响应，将发送端的消息类型分为三种：高级需确认数据消息、低级需确认数据消息和无须确认数据消息。高级需确认数据消息对时序性要求较高，接收端收到消息后必须立即回复确认帧；低级需确认数据消息对时序性要求较低，接收端收到消息后不需要立即回复确认帧，而是在多个消息帧发送结束后，进行合并确认，通过一个确认帧对多个消息帧回复；无须确认数据消息在传输过程中不需要等待确认帧。

b)将原上行消息帧头部中帧控制域中的保留位(RFU)用于 Fpending 控制，使得上行传输也可以采用 Fpending 机制来控制多帧消息的传输，如图 2 所示。

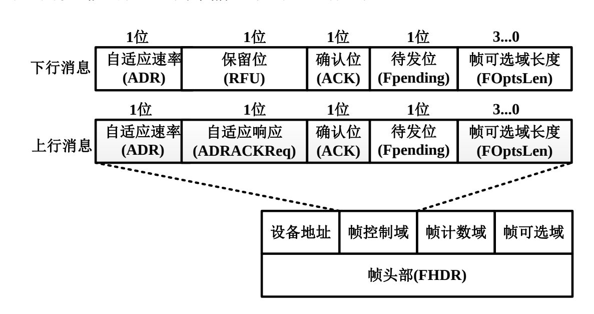


图 2 消息帧控制域

Fig. 2 Message frame control field

c)将原 MAC 头部 MHDR 中的三位保留字段作为需确认帧编号 CDID (confirmed data identity)字段，用于发送端标记其发送的需确认数据消息序号，如图 3 所示。

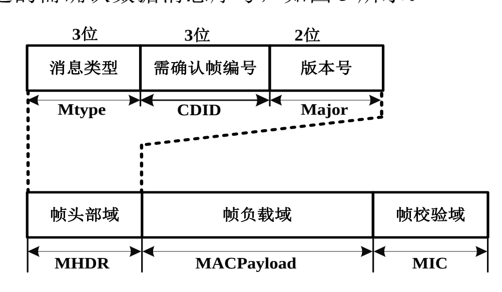


图 3 消息帧头部结构

Fig. 3 Message frame header structure

自适应多帧发送机制具体步骤如下：

a)当发送端(网关/终端)需要发送数据消息时，检测消息类型，若为低级需确认数据消息类型，则将待确认消息帧

计数 Cnt 加 1；若为高级需确认数据消息类型或无须确认数据消息类型，则 Cnt 值保持不变。

b)设置 CDID 值为当前待确认消息帧计数 Cnt 的值，执行下一步。

c)检测发送消息是否为高级需确认数据消息，若为高级需确认数据消息，则设置 Fpending 位为 0，发送数据消息，执行步骤 5；若为低级需确认数据消息，则执行步骤 d)。

d)检测发送缓存区是否存在需要发送的数据消息，若存在，则设置 Fpending 位为 1，发送数据消息，执行步骤 a)；否则，设置 Fpending 位为 0，发送数据消息，执行步骤 e)。

e)结束自适应多帧发送机制。

2.2　自适应多帧接收确认机制

自适应多帧接收确认机制的目标是为了减少确认消息帧数量，降低传输控制开销。其主要思路是通过位向量模式存储数据消息接收状态信息，然后通过一个携带该位向量值的确认消息帧对多个数据消息进行一次确认回复。

自适应多帧接收确认机制具体内容如下：

a)在接收端设置一个 8 bit 的数据接收状态向量 DRSV(data receiving status vector)，用于记录成功接收的需确认数据消息帧的状态，位向量中每一位元素的位置对应需确认数据消息帧的编号，元素值为 1 表示成功收到对应需确认数据消息帧，元素值为 0 表示未收到对应需确认数据消息帧，默认值为 0，如图 4 所示。

b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	b0

图 4　数据帧接收位向量

Fig. 4　The bit vector of data frames received

b)在确认消息帧中通过数据接收状态映射字段 DRSM(data receiving status mapping)存储需确认数据消息的接收状态信息，最多可表示 8 个需确认数据消息的接收状态，因此发送端一次自适应多帧发送流程最多允许传输 8 个需确认数据消息。

自适应多帧接收确认机制具体步骤如下：

a)接收端接收一个数据消息并检测消息类型，若为需确认数据消息，则提取消息帧头部 MHDR 中 CDID 的值，并将 DRSV 中对应 CDID 的元素设置为 1；若为无须确认数据消息，则直接交由上层进行处理。

b)检测 Fpending 位的值，若其值为 1，则表示发送端仍有数据消息需要进行传输，接收端继续打开接收窗口，执行步骤 a)；若其值为 0，则表示发送端无后续数据消息需要进行传输，执行步骤 c)。

c)检测 DRSV 的值，若 DRSV 值为 0，则说明接收端未接收到需确认数据消息，当数据消息接收完毕后，节点直接进入休眠模式或执行其他操作，执行步骤 e)；否则，执行步骤 d)。

d)将确认消息帧的数据接收状态映射字段值设置为数据接收状态向量 DRSV 的值，将帧控制域 FCtrl 中的 ACK 位设置为 1，然后发送该确认消息帧。

e)结束自适应多帧接收确认机制。

2.3　丢帧识别机制

接收端只有在收到低级需确认消息时才需要通过 DRSV 向量记录消息帧接收状态，若 DRSV 的值为 0，则表示未收到低级需确认消息。但是若传输过程中所有需确认消息发生丢包，而 DRSV 值也为 0，此时接收端判定其无须回复确认消息帧，若接收端为终端，则会终端会直接进入休眠模式，造成发送端(网关)一直处于等待确认帧的状态。

因此，提出一种基于 CDID 的低级需确认消息的丢帧识别机制，消息帧中 CDID 字段用于发送端标记其当前发送的需确认数据消息序号，其值与发送端待确认数据消息帧计数 Cnt 保持一致。接收端收到数据消息帧后，通过 CDID 值可判断发送端在传输过程中是否发送了需确认数据消息以及发送了多少个需确认数据消息帧。若发送端发送了 N 个低级需确认数据消息帧和 M 个高级需确认数据消息，但这 N 个低级需确认消息帧在传输过程中全部丢失，此时虽然 DRSV 值为 0，但接收端收到的最后一个消息帧中的 CDID 值并不为 0，由此可确定发送端一定发送过需确认数据消息，此时终端必须回复一个确认帧，而不能立即进入休眠模式，影响后续数据消息的接收。

3　算法数学分析

本小节分别对 AMFET 机制的多帧传输能耗情况及多帧传输时间复杂度进行了数学分析。

引理 1　AMFET 机制的多帧传输能耗低于原 LoRaWAN 传输机制。

证明　假设网关节点总共发送 N 条无须确认消息和 N 条需确认消息。 E_{L1} 和 E_{L2} 分别表示 LoRaWAN 传输机制下传输无须确认消息和需确认消息的能耗， E_{A1} 和 E_{A2} 分别表示 AMFET 传输机制下传输无须确认消息和需确认消息的能耗。故有

$$E_{L1}=E_{s_t}+N\left(E_{tx}+E_{sleep}+E_{s_r}+E_{rx_nack}\right) \tag{1}$$

$$E_{L2}=E_{s_t}+(N+r)\left(E_{tx}+E_{sleep}+E_{s_r}+E_{rx_ack}\right) \tag{2}$$

在 AMFET 传输机制下，一个传输过程最多可发送 8 个消息帧，则 N 个消息帧的传输可划分为 k (k 为 N 对 8 的取整)个发送过程，则有

$$\begin{aligned}E_{A1}=&E_{s_t}+k\left(8\times E_{tx}+E_{sleep}+E_{s_r}+E_{rx_nack}\right)\\&+(N-8k)E_{tx}+E_{sleep}+E_{s_r}+E_{rx_nack}\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}E_{A2}=&E_{s_t}+k\left(8E_{tx}+E_{sleep}+E_{s_r}+E_{rx_ack}\right)\\&+(N-8k)E_{tx}+E_{sleep}+E_{s_r}+E_{rx_ack}\end{aligned} \tag{4}$$

其中： E_{s_t} 表示睡眠模式切换到发送模式的切换能耗， E_{tx} 表示发送能耗， E_{sleep} 表示休眠能耗， E_{s_r} 表示休眠模式切换到接收模式的切换能耗， E_{rx_nack} 表示接收无须确认消息能耗， E_{rx_ack} 表示接收需确认消息能耗， r 为重传次数。

由式(1)(3)可得

$$E_{L1}-E_{A1}=(N-k-1)\left(E_{sleep}+E_{s_r}+E_{rx_nack}\right) \tag{6}$$

由式(2)(4)可得

$$E_{L2}-E_{A2}=rE_{tx}+(N+r-k-1)\left(E_{sleep}+E_{s_r}+E_{rx_ack}\right) \tag{7}$$

因为 $r\geq 0$ ， $N>k+1$ ，由式(6)(7)可知， $E_{A1}<E_{L1}$ ， $E_{A2}<E_{L2}$ ，因此说明 AMFET 机制相对于原 LoRaWAN 传输机制在能耗上得到了优化，证毕。

引理 2　AMFET 机制的多帧传输时间小于原 LoRaWAN 传输机制。

证明　设单个消息包传输时间为 t_0 (消息包长度和发送速率为固定值)， T_{L1} 表示 LoRaWAN 传输机制下传输多个无须确认消息包的时长， T_{A1} 表示 AMFET 传输机制下传输多个无须确认消息包的时长。则有

$$T_{L1}=t_s+N(t_0+t_1+t_2+t_s+t_3) \tag{8}$$

$$T_{A1}=t_s+N(t_0+t_1)+(k+1)(t_2+t_s+t_3) \tag{9}$$

$$T_{L1}-T_{A1}=(N-k-1)(t_2+t_s+t_3) \tag{10}$$

其中：t_s 表示模式切换时间，t_1 表示发送窗口持续时间，t_2 表示休眠窗口时间，t_3 表示接收窗口时间，k 表示 N 个消息包的发送过程数。

由式(10)可知，$T_{A1}<T_{L1}$，因此说明 AMFET 机制在多帧传输中能够有效降低整体传输时长，即 AMFET 机制的时间复杂度低于原 LoRaWAN 传输机制。同理，可证明在多个需确认消息传输情况下，AMFET 机制的时间复杂度也低于原 LoRaWAN 传输机制，证毕。

4 实验验证与分析

4.1 实验测试场景及平台

本实验从传输能耗、传输时延和传输成功率三个方面对基于 LoRaWAN 的自适应多帧高效传输方法的性能进行测试和验证，数据测试基于以下网络拓扑结构进行，如图 5 所示。

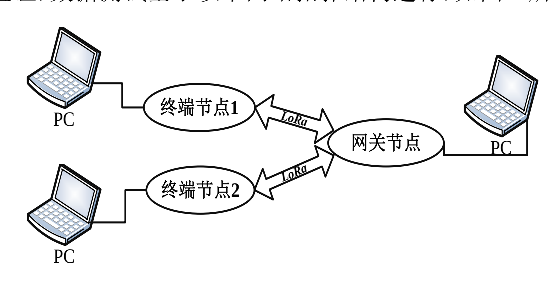


图 5 网络拓扑结构

Fig. 5 Network topology

图 5 中终端节点与网关节点硬件均采用锐米通信科技公司提供的 LoRa 无线开发板，主要由 STM8L151C8T6 单片机和 SX1278 射频模块[14]组成。网络拓扑中所有节点在测试中通过串口转换线与 PC 机连接，通过 ST-Link V2 下载、调试程序，通过串口调试软件查看通信数据帧的接收情况。网络拓扑中网关节点与终端节点间通过 LoRa 无线技术在单跳范围内进行通信。

4.2 传输能耗测试与分析

根据 STM8L151 和 SX1278 射频芯片工作模式，将终端节点整个通信过程分为待机模式、发送模式、接收模式和休眠模式四个部分。本小节实验中，针对终端节点工作在不同模式下，采用万用表测试节点的工作电流值，由测试结果可知，待机模式下的平均电流为 23.57 mA、发送模式下的平均电流为 84.37mA、接收模式下的平均电流为 33.87 mA、休眠模式下的平均电流为 10.24 uA。

根据 LoRaWAN 协议规定，各个模式下窗口的持续时间如表 1 所示。

表 1 工作模式下的窗口持续时间

Table 2 Window duration in working mode

节点窗口	持续时间
发送窗口	1742.28ms
接收窗口 1(接收 ACK)	1495.08ms
休眠窗口 1	1000.00ms
接收窗口 1(无 ACK)	≥247.08ms

由于测试过程中电压值(3.3 V)保持不变，本实验通过计算电荷量 Q 来反映终端的能耗情况。终端节点由睡眠模式切换到正常工作模式需要一个切换时间，实际测试值为 240 us，而一次完整的消息传输流程通常需要 2 次切换操作。

根据公式 $Q=I\times t$ 计算可得：发送窗口的发送能耗 Q_{tx} 为 147 mC，休眠窗口 1 的休眠能耗 Q_{sleep} 为 10.24 uC，接收窗口 1 的接收能耗(无 ACK 消息) Q_{nack} 为 8.37 mC，接收窗口 1 的接收能耗(ACK 消息) Q_{ack} 为 50.6 mC，从睡眠模式切换至发送模式的能耗 Q_{st} 为 10.1 uC，从睡眠模式切换至接收模式的能耗 Q_{sr} 为 4.1 uC。

本节实验分别在 LoRaWAN 传输机制和 AMFET 机制下测试节点发送 100 条需确认数据消息(ACK_MSG)和 100 条无须确认数据消息($NACK_MSG$)的传输总电量，通过实验测试数据及计算分析可得节点能耗值，测算结果如表 2 所示。

表 2 节点能耗测算结果

Table 2 Result of node energy consumption

消息类型	原机制能耗	AMFET 机制能耗	节能百分比
NACK_MSG	15538mC	14809mC	4.7%
ACK_MSG	20228mC	17885mC	11.6%

由表 2 可知，相对于原 LoRaWAN 传输机制，AMFET 机制在多消息帧传输过程中节省了能量，并且当传输的消息为需确认数据消息时，AMFET 机制的节能效果更加明显，这主要是因为 AMFET 机制通过位向量压缩技术存储多个低级需确认数据消息的接收状态，从而以合并确认的方式对多个需确认数据消息进行统一确认，减少了确认消息的个数，从而降低了传输能耗。同时，AMFET 机制优化了上行多帧传输方案，避免终端打开不必要的接收窗口，从而降低接收模式阶段的能耗。

4.3 传输时延测试与分析

本节实验分别对多个无须确认数据消息和多个需确认数据消息(包括低级需确认消息和高级需确认消息两部分)的传输时延进行测试，所有消息负载都为 50 Byte 的数据。其中节点工作参数设置为：扩频因子 12、带宽 125 kHz、错误编码率 4/8，发射功率 17 dBm。两种场景下的数据消息传输时延测试结果如图 6、7 所示。

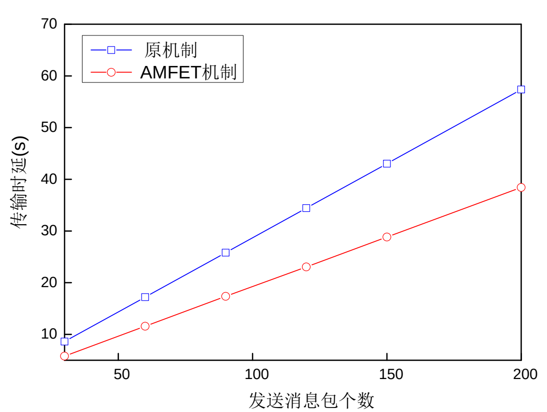


图 6 NACK_MSG 传输时延

Fig. 6 Transmission delay of NACK_MSG

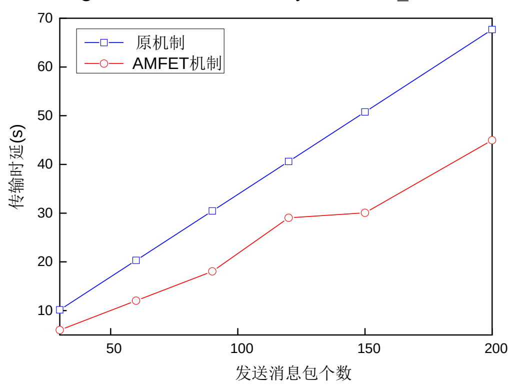


图 7 ACK_MSG 传输时延

Fig. 7 Transmission delay of ACK_MSG

由图 6、7 可知，与原 LoRaWAN 传输机制相比，AMFET

机制缩短了无须确认数据消息(NACK_MSG)和需确认数据消息(ACK_MSG)在多帧传输过程中的总传输时间，降低了数据的传输时延。这主要是因为在 LoRaWAN 上行多帧传输方案中引入 Fpending 机制，对“空消息”触发下行数据连续发送方式进行优化，提高了下行数据消息的传输效率。

在多个需确认数据消息传输场景下，由于消息传输存在重传过程，因此传输时延相对于无须确认数据消息而言增大。由于 AMFET 机制对需确认数据消息划分高、低等级，使得高级需确认数据消息能够得到立即确认。同时，AMFET 机制采用位向量压缩技术对多个低级需确认数据消息进行了合并确认，从而减少了确认消息帧个数，随着发送数据消息包个数的增加，AMFET 机制的传输时延的降低效果越明显。

4.4 传输成功率测试与分析

数据包的传输成功率能够直观地反映 AMFET 机制的可靠性，本小节实验在不同传输距离及不同扩频因子条件下对数据消息传输成功率进行了测试。其中节点工作参数设置为：扩频因子 SF=9、11、12，带宽 250 kHz，错误编码率 4/8，发射功率 17 dBm。

在不同条件下的数据包传输成功率测试结果如图 8~10 所示。

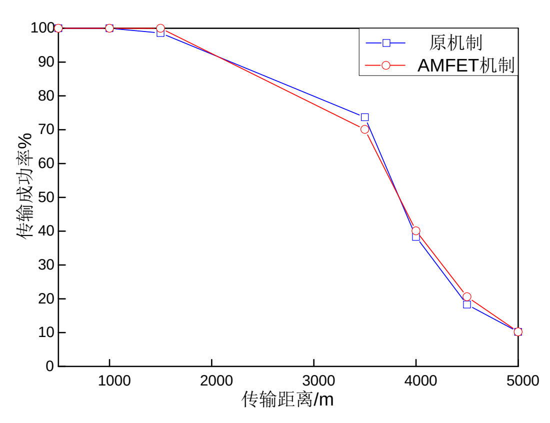


图 8 传输成功率(SF=9)

Fig. 8 Transmission success rate when SF=9

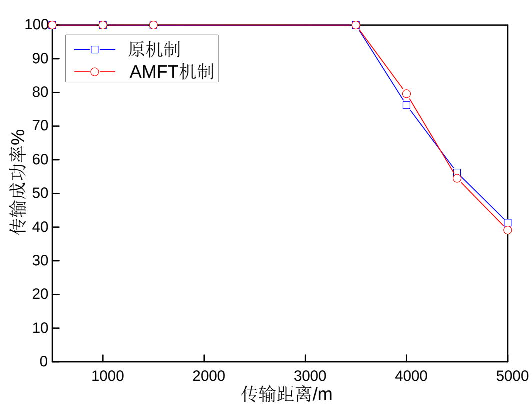


图 9 传输成功率(SF=11)

Fig. 9 Transmission success rate when SF=11

由图 8~10 可知，传输距离和扩频因子都是影响数据包传输成功率的因素，在不同扩频因子条件下，数据消息成功传输的最大距离不同，并且扩频因子越大，数据最大传输距离越远。同时，在相同扩频因子和相同传输距离的条件下，AMFET 机制与原 LoRaWAN 机制的数据包传输成功率基本保持一致，由此说明 AMFET 机制在降低传输能耗和传输时延的前提下，仍然能够保证数据消息传输的可靠性。

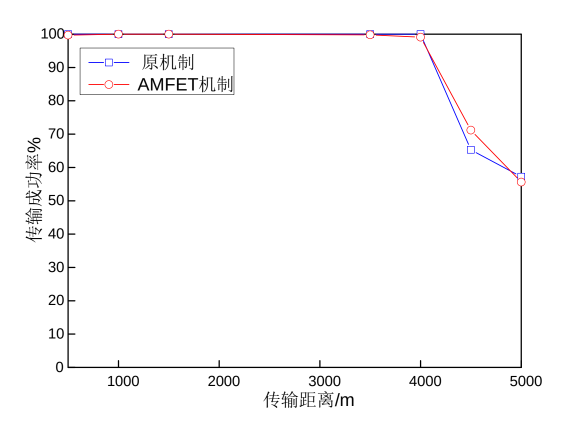


图 10 传输成功率(SF=12)

Fig. 10 Transmission success rate when SF=12

5 结束语

本文针对 LoRaWAN 多帧传输机制存在控制开销、时延和能耗相对较大的缺陷，提出一种自适应多帧高效传输方法(AMFET)，包含自适应多帧发送机制、自适应多帧接收确认机制和丢帧识别机制。自适应多帧发送机制将需确认数据消息类型划分高、低优先等级，使高级需确认数据消息能够立即得到确认，同时在上行多帧传输中引入 Fpending 机制，提高了消息传输效率；自适应多帧接收确认机制利用位向量压缩技术对多个低级需确认数据消息进行合并确认，从而减少确认消息个数，降低控制开销；丢帧识别机制利用 CDID 值判断发送端是否发送了低级需确认消息，避免低级需确认消息的丢失引起终端进入休眠模式。通过数学分析和实验测试结果表明，AMFET 方法在保证数据传输可靠性的前提下，降低了多帧传输时延和多帧传输能耗，验证了改进机制的有效性。

参考文献：

[1] Wu S, Kang S, Chakrabarti C, *et al.* Low power baseband processor for IoT terminals with long range wireless communications [C]//Proc of IEEE Global Conference on Signal and Information Processing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2016: 728-732.

[2] Ali A, Shah G A, Farooq M O, *et al.* Technologies and challenges in developing Machine-to-Machine applications: A survey [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2017, 83: 124-139.

[3] Hu X, Yang L, Xiong W. A novel wireless sensor network frame for urban transportation [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2015, 2(6): 586-595.

[4] Stan V A, Timnea R S, Gheorghiu R A. Overview of high reliable radio data infrastructures for public automation applications: LoRa networks [C]//Proc of International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, 2017: 1-4.

[5] Lavric A, Popa V. LoRa™ wide-area networks from an internet of things perspective [C]//Proc of International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence.2017: 1-4.

[6] Martin B, Utz R, Thiemo V, *et al.* Do LoRa low-power wide-area networks scale [C]//Proc of ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. New York: ACM Press, 2016: 59-67.

[7] Sornin N, Luis M, Eirich T, *et al.* LoRaWAN specification v1. 0. 2 [EB/OL]. (2016) [2019-01-08]. https://www. lora-alliance. org/.

[8] Lavric A, Petrariu A I. LoRaWAN communication protocol: The new

era of IoT [C]//Proc of International Conference on Development and Application Systems.2018: 74-77.

[9] 孙曼，张乃谦，金立标，等．基于 LoRa 标准的 MAC 层协议研究 [J]. 电视技术, 2016, 40(10): 77-81. (Zhang Man, Zhang Naiqian, Jin Libiao, *et al.* Study on MAC layer protocol based on LoRa standard [J]. Television Technology, 2016, 40(10): 77-81.)

[10] Abeele F, Haxhibeqiri J, Moerman I, *et al.* Scalability analysis of large-scale LoRaWAN networks in ns-3 [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 4: 6.

[11] Goursaud C, Mo Y. Random unslotted time-frequency ALOHA: theory and application to IoT UNB networks [C]//Proc of International Conference on Telecommunications. 2016.

[12] Lavric A, Popa V. Internet of things and LoRa™ low-power wide-area networks: A survey [C]//Proc of International Symposium on Signals, Circuits and Systems. 2017: 1-5.

[13] Centenaro M, Vangelista L. Boosting network capacity in LoRaWAN through time-power multiplexing [C]//Proc of the 29th IEEE Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2018: 1-6.

[14] 肖思琪，全惠敏，钟晓先．基于 LoRa 的远程抄表系统的设计与实现 [J]. 电子技术应用, 2018, 44(6): 31-34, 38. (Xiao Siqi, Quan Huimian, Zhong Xiaoxian. Design and implementation of remote meter reading system based on LoRa [J]. Electronic Technology Application, 2018, 44(6): 31-34, 38.)